

Deponeringsdjupets betydelse vid slutförvaring av högaktivt kärnavfall i berggrunden

--- en karakterisering av grunda och djupa slutförvar ---

Karl-Inge Åhäll

Rapport till Kärnavfallsrådet

Januari 2011

Förord

Metoden "Djupa borrhål" har på senaste år uppmärksammats i den offentliga debatten kring slutförvarsfrågan som ett alternativ till KBS-3 metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle. Enligt metoden djupa borrhål ska avfallet placeras i kapslar som deponeras i berggrunden i 3000 – 5000 meters djup.

Kärnavfallsrådets uppdrag är att vara rådgivande och kritiskt reflekterande inför beslutet om slutförvaring av använt kärnbränsle. Inom ramen för rådets arbete är det viktigt att frågor kopplade till omhändertagande av det högaktiva kärnavfallet får sin belysning och gestaltning från olika håll med insikt och kunskap byggd på vetenskapliga grunder.

Kärnavfallsrådet (dåvarande KASAM) höll i mars 2007 en utfrågning om djupa borrhål som metod för att slutförvara använt kärnbränsle. Utfrågningen var en del av rådets genomlysningsprogram med syftet att allsidigt belysa djupa borrhål som alternativ metod till KBS-3-metoden. Genomlysningen skulle diskutera hur långt utvecklingen på området kommit och om ytterligare forskning på området är önskvärd. Presentationer gav också information om vilka tekniska, geologiska och hydrologiska förutsättningar och möjligheter som finns.

Sedan utfrågningen har utvecklingen av metoden fortsatt och begäran på ytterligare redogörande kring djupa borrhål har lyfts i samband med granskningen av SKB:s Forskning, utveckling och demonstrationsprogram (Fud-program).

Målet med denna rapport är att vidga kunskaperna om deponeringsdjupets betydelse vid slutförvaring av högaktivt kärnavfall i bergsgrunden. Rapporten är en uppföljning och uppdatering av det som framkom under Kärnavfallsrådets seminarium 2007 och sammanställning av ny kunskap som har framkommit i bl.a. USA, England och Sverige.

Karl-Inge Åhäll anlätades som konsult av Kärnavfallsrådet för att skriva denna rapport. De åsikter som framförs i rapporten är författarens egna och stämmer inte nödvändigtvis överens med Kärnavfallsrådets åsikter och ställningstaganden.

Torsten Karlsson
Kärnavfallsrådets ordförande

Holmfridur Bjarnadóttir
Kärnavfallsrådets kanslichef

Om rapportens författare

Karl-Inge Åhäll är berggrundsgeolog och professor vid Karlstads universitet.

Utöver ett 30-tal vetenskapliga artiklar med fokus på Sveriges berggrundsbildning har Åhäll även skrivit en populärvetenskaplig bok ***Geologi i Dalsland*** (1993) och deltagit i Svenska Naturskyddsföreningens framtagning av en ***Policy för geologiska naturvärden*** (1998).

2006 sammanställde Åhäll data om förhållandena i berggrunden på stora djup i en populärvetenskaplig rapport med fokus på kärnavfallsfrågan ***”Slutförvaring av högaktivt kärnavfall i djupa borrhål”*** (MKG Rapport 1, maj 2006, ISSN: 1653-6800).

I mars 2007 medverkade Åhäll vid KASAMs (nuvarande Kärnavfallsrådet) utfrågning om ***”Djupa borrhål – Ett alternativ för slutförvaring av använt kärnbränsle?”***

Efter Kärnavfallsrådets självständiga bedömning av FUD 07 fick Åhäll uppdraget att belysa kunskapsnivån för djupa borrhål och vilka brister som finns inför en svensk MKB-prövning. Rapporten ***”Brister i redovisningen av djupa borrhål som alternativmetod inför MKB-prövningen av ett svenskt slutförvar”*** presenteras för rådet i feb 2009 och färdigställdes i mars 2009.

Innehållsförteckning

1	Bakgrund	5
2	Det svenska kärnavfallsprogrammet	6
3	Elementa för slutförvaring i kontinental berggrund	7
	<i>Grundvattnets zoner i berggrunden – en modell</i>	8
4	Grunda slutförvar -- allmän karakteristik och säkerhetsaspekter	10
5	Djupa slutförvar -- allmän karakteristik och säkerhetsaspekter	12
6	Konceptet djupa borrhål -- en lägesrapport om teknik, utformning, ekonomi och återtagbarhet	15
7	Borrhålskonceptets hydrogeologiska förutsättningar	17
	-- <i>Uppgradera kunskapen om grundvattnets densitetsskiktning</i>	
	-- <i>Finns lämpliga områden som är tillräckligt stora</i>	
8	Slutsatser för valet av deponeringsdjup	18
	-- <i>Fler-barriärprincipen</i>	18
	-- <i>Förvarens lokalisering</i>	20
	-- <i>Effekter av jordskalv och istider</i>	20

1 Bakgrund

När man på 1970-talet började utreda kärnkraftens avfallsproblem fanns flera uppslag för det högaktiva avfallet men efterhand beslöts i de flesta länder att förordna någon form av slutförvaring i berggrunden; -- en så kallad **geologisk deponering**.

Beroende på berggrundens egenskaper på olika djup finns tre huvudalternativ för en geologisk deponering:

- att slutförvara **flera hundra meter ner** i kontinental berggrund,
- att slutförvara **flera km ner** i kontinental berggrund,
- att slutförvara **i en oceanisk jordskorpa i anslutning till en djuphavsgrav, ca 6-8 km ner**, varav några km ned i oceanisk jordskorpa.

Det tredje konceptet har aldrig utvecklats vidare, bl.a för att det anses oförenligt med internationella avtal mot havsdumpning. Konceptet har ändå ett metodologiskt intresse då det baseras på jordklotets egen dynamik (*platt-tektoniken*) i och med att kärnavfallet då skulle placeras i en oceanisk jordskorpa som av platttektoniken förs nedåt mot jordens inre.

2 Det svenska kärnavfallsprogrammet

När det svenska kärnavfallsprogrammet inleddes på 1970-talet, fanns inte mycket som kunde motivera en djupare slutförvaring än det som redan då blev den svenska handlingslinjen; -- **att kärnavfallet ska kapslas in och slutförvaras ca 500 meter ner i stabilt urberg.**

Den tidiga fokuseringen på 500-metersnivån var logisk. Främst för att sådana djup kunde nås med gängse gruvbrytningsteknik och utan att riskera alltför höga bergsspänningar i deponins tunnlar och schakt. Därtill bedömdes 500 m vara tillräckligt djupt för att skydda mot den tidens terroristhot i Europa (*den tyska Baader-Meinhoff-ligan med kontakter i både Mellanöstern och Sverige*). Vidare fanns geofysiska mätdata som påvisade förändringar på djup kring 1-1,5 km, vilket bedömdes negativt eftersom det skulle krävas mer resurser för att klarlägga förhållandena så djupt ner.

Avgörande var också att man hade slutförvaringskriterier som i praktiken eliminerade alla metoder som bygger på "en torr slutförvaring" (*bl.a Dry Rock Deposit*) eftersom sådana deponier skulle kräva en mer kontinuerlig tillsyn för att upprätthålla säkerheten över tid.

Den tidiga fokuseringen på 500-metersnivån var således rimlig med den tidens kunskapsläge. Om deponin sen borde placeras 400, 500 eller kanske 700 m ner kunde avgöras längre fram när man väl undersökt förhållandena på dessa djup

Efter dessa tidiga ställningstaganden har det svenska kärnavfallsprogrammet fortsatt i dryga 30 år utan några större ändringar.

Och fokuseringen på 500-metersnivån har varit framgångsrik i så motto att den svenska kraftindustrin idag har ett mer teknologiskt genomarbetat slutförvaringskoncept än andra länder; -- den så kallade KBS-metoden.

Å andra sidan har inte mycket gjorts för att komplettera det svenska kärnavfallsprogrammet i takt med senare års kunskapsutveckling om berggrundens hydrogeologiska egenskaper på större djup.

3 Elementa för slutförvaring i kontinental berggrund

I kontinental berggrund av svensk typ (*urberg*) dominerar bergarter som gnejs och granit. Och i dessa finns sprickor och porutrymmen som kan vara vattenförande; -- så kallat **grundvatten**.

Överst i berggrunden finns sprickor och spricksystem som är mer eller mindre öppna och sammanlänkade, vilket gör att grundvatten rör sig genom berggrunden så att nettoflödet går från regionala inströmningsområden mot utströmningsområden (*se figur, sid 8*).

Med stigande djup ökar trycket i berggrunden så att sprickor och porutrymmen pressas samman. Härigenom minskas andelen öppna och sammanlänkade sprickor, vilket bl.a minskar bergets genomsläpplighet (**permeabilitet**) av vatten och gaser, vilket i sin tur medför att grundvattnets influens av marknära faktorer också avtar med stigande djup.

Överst i berggrunden finns därför en zon där både grundvattnet och den geokemiska miljön präglas av marknära processer som nederbörd och infiltration men också av biologisk aktivitet; -- främst genom bakterier.

Längre ned, under en mer eller mindre bred övergångszon på ca 1-1,5 km djup, finns ett helt annat grundvatten och detta är betydligt saltare och därmed tyngre.

Schematiskt kan berggrundens hydrogeologiska övergångszon sägas separera två olika grundvatten, *se figur sid 5*. Ett övre grundvatten som är förhållandevis lätt och lätttröligt och ett undre som är tyngre och i det närmaste orörligt.

Grundvattnets låga mobilitet på stora djup beror på två saker; -- dels bergets låga permeabilitet och dels att det i normala urbergsområden inte finns någon geotermisk energi som kan orsaka grundvattenflöden.

Eftersom grundvattnets zonerings styrs av vattnets densitet, blir zonerings stabil i områden som inte påverkas av yttre störningar. Och att zonerings verkligen kan vara mycket stabil över tid visas av att man på flera km:s djup har funnit ett salt grundvatten som inte varit i kontakt med marknära processer över så långa tidsrymder som årmiljoner.

Den hydrogeologiska övergångszonens läge och karaktär påverkas av flera faktorer, bl.a av ändrad nederbörd och under nedisningar (*istider*). Över tid kan det därför bli relativt stora ändringar i den geokemiska miljön på de nivåer där dagens övergångszon ligger; dvs kring nivåer 1-1,5 km ner. Och då sådana förändringar ökar sårbarheten för ett slutförvars skyddsbarriärer, finns inga skäl att ens överväga en slutförvaring i närheten av denna zon.

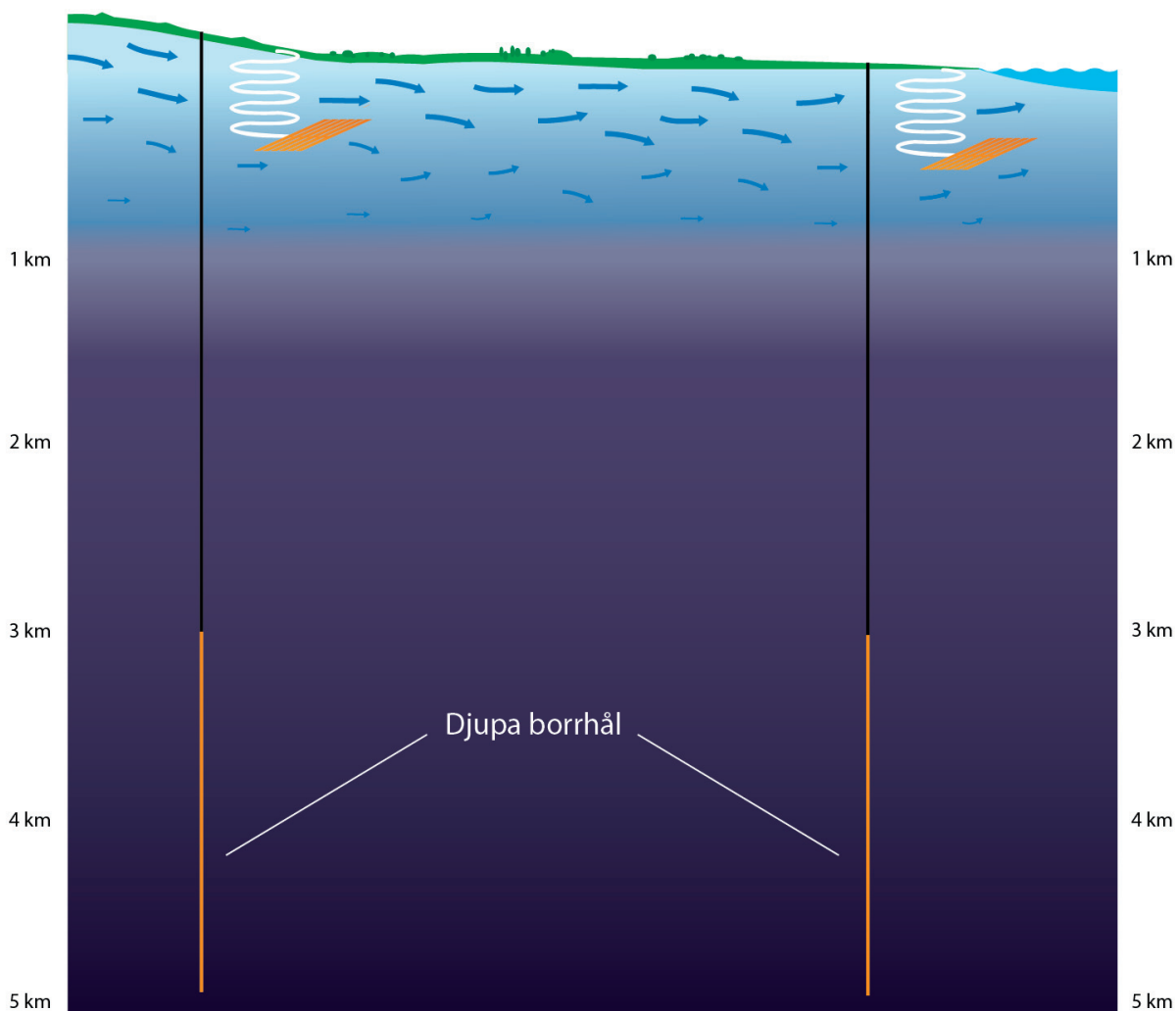
Grundvattnets zonerings gör att det i normal kontinental berggrund finns en hydrogeologisk övergångszon som begränsar valet av deponeringsdjup så att det i praktiken bara finns två alternativ för högaktivt kärnavfall:

→ **en grund deponering, ca 400-700 meter ned**

→ **en djup deponering, minst 2-3 km ned**

Den stora skillnaden i förvaringsdjup medför att det även blir stora skillnader mellan grunda och djupa slutförvar då både deponeringsteknik och förvarets funktion måste anpassas till just de fysiska, geokemiska och hydrogeologiska förhållanden som råder på respektive deponeringsdjup

Grundvattnets zoner i berggrunden – en modell



Överst i berggrunden finns en km-bred zon med ett rörligt grundvatten (*blå färg*). I denna zon kan grundvattenflödena variera lokalt men över tid sker en nettotransport (*blå pilar*) från inlandets inströmningsområden och mot regionala utströmningsområden.

Under en övergångszon på ca 1-1,5 km djup finns ett grundvatten som är mycket saltare och därmed tyngre (*lila färg*). I normala urbergsområden har detta grundvatten låg mobilitet och en stabil densitetsskiktning som hämmar uppåtriktade flöden och särskilt flöden genom övergångszonen.

Deponeringsnivån vid en grund geologisk deponering (ca 400-700 m) speglar ambitionen att avfallskapslarna ska vara väl skyddade, svåråtkomliga men samtidigt möjliga att återta. Den nedre gränsen (ca 700 m) styrs främst av kravet att även över tid ha god marginal nedåt till övergångszonen i och med att det finns flera faktorer som kan förskjuta zonen uppåt i berggrunden.

Deponeringsnivån för djupa slutförvar anges ibland till 2-4 km. I senare studier anges i allmänhet ca 3-5 km, vilket ytterligare ökar avståndet, och därmed marginalen till övergångszonen men också till alla former av markbundna störningar i berggrunden.

Säkerheten för en grund deponi avgörs främst av skyddsbarriärernas förmåga att hålla kvar radioaktiva ämnen inom deponin eftersom läckage på denna nivå i berggrunden inte kan hindras från att spridas vidare i och med att deponin omges av ett rörligt grundvatten.

Över tid kommer säkerheten främst att vila på deponins konstruerade barriärer, dvs avfallets inkapsling i särskilda behållare och övriga barriärers förmåga att upprätthålla en tillräckligt stabil geokemisk miljö runt avfallskapslarna.

Säkerheten för en djup deponi är ännu inte klarlagd i samma detaljeringsgrad. Avgörande är att avfallskapslarna kan deponeras i borrhål på 3-5 km djup utan att det varaktigt stör grundvattnets stratifiering (densitetsskiktning) kring förvaret. Och ännu återstår att utveckla en tillförlitlig deponeringsteknik för detta.

Över tid kommer säkerheten att vila på berggrundens naturliga barriärer som på dessa djup är av såväl fysisk, hydrogeologisk som geokemisk karaktär, *se vidare i avsnitt 5 sid 12*.

Sammanfattningsvis är det berggrundens hydrogeologiska zonerings -- med två helt olika grundvatten -- som styr geologiska deponiers utformning, deponeringsteknik och funktion över tid

Kunskapen om berggrundens hydrogeologiska zonerings och dess stabilitet över tid bygger till stor del på senare års kunskapsutveckling. Konsekvenserna för en slutförvaring av kärnavfall uppmärksammades därför först mer allmänt efter 1998 och således först när den svenska kraftindustrins fokusering på en grund deponering pågick i 20 år.

4 Grunda slutförvar -- allmän karakteristik och säkerhetsaspekter

Bakom valet av deponeringsdjup för grunda slutförvar (400-700 m) finns en avvägning av flera önskemål;-- bl.a att avfallskapslarna ska vara väl skyddade, svåråtkomliga men ändå möjliga att återta.

Grunda slutförvar baseras på *existerande gruvbrytningsteknik*, vilket markeras i begreppet "*mined repository*". Det teknologiskt mest utvecklade exemplet på en grund deponi för högaktivt kärnavfall är den svenska KBS-metoden och utförliga beskrivningar finns i kraftindustrins FUD-rapporter.

En konceptuell fördel med grunda deponier är att de medger en noggrann genomförandekontroll i och med att deponerings- och förslutningsarbeten kan genomföras stegvis och i redan färdigställda tunnlar och schakt, vilket borgar för hög säkerhet under förvarets inledande skeden

På längre sikt blir säkerheten mer problematisk och av två skäl. Dels att skyddsbarriärer och avfallskapslar kan skadas vid större jordskalv men även genom avsiktliga eller oavsiktliga intrång i förvarsområdet. Dels att grunda slutförvar ligger i den övre zon i berggrunden som har ett rörligt och över tid föränderligt grundvatten till följd av markbundna processer. Denna hydrogeologiska miljö ställer mycket stora krav på förvarets skyddsbarriärer eftersom läckage från grunda slutförvar visserligen kan spädas ut och fördröjas på dessa nivåer i berggrunden **men aldrig hindras från att spridas vidare uppåt för att efterhand nå marknära nivåer i grundvattnets utströmningsområden, se figur sid 8.**

Grunda slutförvar har således **konceptuella svagheter** just genom att deponier på denna nivå i berggrunden omges av ett rörligt grundvatten med kapacitet att transportera läckage upp till marknära nivåer i grundvattnets utströmningsområden

Dessvärre har denna hydrogeologiska utsatthet visat sig svår att hantera säkerhetsmässigt. Exempelvis har inte ens den teknologiskt avancerade KBS-metoden kunnat förses med skyddsbarriärer som fungerar oberoende av varandra, *se sid 19 om fler-barriärprincipen.*

Återtagbarhet. Säkerheten för grunda slutförvar påverkas även av möjligheten att återta avfallskapslar. Denna möjlighet medför lägre risk i vissa framtidsscenarier men högre risk i andra, vilket gör frågan komplex.

Positivt är att framtida generationer kan få ökad valfrihet i och med att de, vid behov, skulle ha möjlighet att genomföra förstärkningsinsatser av förvaret eller också att helt avbryta slutförvaringen till förmån för något som då bedöms vara bättre. Vidare skulle man då kunna återta kärnavfall för att använda vissa komponenter i framtida teknologier. Men dessa möjligheter är svåra att värdera kvalitativt då de förutsätter förhållanden som ej kan garanteras över tid. Exempelvis kan ingen här och nu säkerställa att de människor som lever här om några hundra år, eller som en gång kanske återbefolkar Sverige efter en nedisning, verkligen

kommer att ha den teknologiska kompetens som krävs för att kunna återta avfallskapslar eller ens för att upptäcka om läckage har uppstått.

Med återtagbarhet följer också ökade säkerhetsrisker. Ex.vis kan framtida generationer utsättas för ökad risk just därför att det mycket giftiga och plutoniumhaltiga kärnavfallet har deponerats så att det kan återtas.

I praktiken blir återtagbarheten av kärnavfall i grunda deponier villkorad den framtida samhällsutvecklingen. Och många aspekter kan beaktas i säkerhetskalkylernas olika scenarier men ändå aldrig förutses fullt ut

Av dessa skäl bör inte återtagbarhet användas som ett styrande villkor (*bortsållningskriterie*) vid val av slutförvaringsmetod även om det medför fördelar i vissa framtidsscenarier

Rättsliga konsekvenser. Grunda deponiers återtagbarhet har också rättsliga aspekter. Det beror på att använt kärnbränsle innehåller klyvbara material som plutonium, vilket innebär krav på övervakning av deponin, bl.a för att leva upp till internationella åtaganden för att hindra spridning av kärnvapenmaterial. Själva möjligheten att återta svenskt kärnavfall innebär således en målkonflikt eftersom en övervakning som de facto **förs över på kommande generationer** strider mot ett grundläggande svenskt slutförvaringsvillkor; -- nämligen att slutförvaringsmetoden inte ska kräva framtida övervakning eller underhåll för att fungera.

Denna målkonflikt för grunda deponier av KBS-typ påtalades tidigt i den svenska FUD-granskningen men medförde aldrig någon allsidig genomlysning, kanske främst för att det då saknades förvarsalternativ som inte hade samma övervakningsproblematik.

Hur denna målkonflikt kring behovet av framtida övervakning ska hanteras, återstår att se. Till dess kvarstår osäkerheten om grunda deponier med använt kärnbränsle kan infria de mål som ställs på ett svenskt slutförvar; -- nämligen att inte belasta kommande generationer med onödiga åtaganden, ansvar eller kostnader till följd av vår tids kärnkraftsverksamhet

Slutord. Att överhuvudtaget karakterisera grunda deponier i form av konceptuella för- och nackdelar, är relativt nytt. Tidigare, innan man upptäckt grundvattnets zoner i berggrunden, var en sådan redovisning knappast meningsfull i och med att det då saknades slutförvaringsmetoder som inte hade liknande säkerhetsproblematik.

5 Djupa slutförvar -- allmän karakteristik och säkerhetsaspekter

En slutförvaring i kristallin berggrund på 3-5 km djup förutsätter att avfallskapslarna deponeras i *djupa borrhål*, vilket framgår av begreppet "*deep borehole disposal*".

Sammanställningen nedan baseras främst på studier i USA, England och Sverige där man också använt termodynamiska analyser för att belysa ett borrhålsförvars utformning och funktion över tid. Referenser anges nedan och värt att observera är att det finns två svenska rapporter (SKB TR-98-05 och SKB R-04-09) med bra redovisningar av hydrogeologiska data.

- 1 -- **Brady et al.**, "*Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste*", SAND2009-4401, Aug 2009.
- 2 -- **Jensen and Driscoll**, "*A Framework for Performance Assessment and Licensing for Deep Borehole Repositories*", MIT-NFC-TR-115, Jan 2010.
- 3 -- **Gibbs et al., 2008**, "*High-density support matrices: Key to the deep borehole disposal of spent nuclear fuel*", *Journal of Nuclear Materials* 374, 370-377.
- 4 -- **NIREX Report N/108**, "*A review of the deep borehole disposal concept for radioactive waste*", June 2004.
- 5 -- **J. Smellie**, "*Recent geoscientific information relating to deep crustal studies*". SKB R-04-09, 2004.
- 6 -- **T. Harrison**, "*Very deep borehole: Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability*", SKB R-00-35, May 2000.
- 7 -- **Juhlin et al., 1998**, "*The Very Deep Hole Concept: Geoscientific appraisal of conditions at great depth*", SKB TR-98-05.

Först bör sägas att konceptet djupa borrhål är under utveckling och därför inte kan redovisas i samma detaljeringsgrad som grunda deponier.

Därtill finns vitt skilda bedömningar. Exempelvis bedömer den svenska kraftindustrins kärnavfallsbolag (SKB) i sina FUD-redovisningar att borrhålsförvar inte kan ge några egentliga fördelar. I andra studier (*bl.a 1-4 ovan*) bedöms borrhålsförvar ha förutsättningar att ge hög säkerhet över tid ("*excellent long-term safety performance*", *ref 1 ovan*) och till samma kostnader som för grunda geologiska deponier (*bl.a 1 och 6 ovan*). Förutsättningen är att förvaret placeras i ett område med lämpliga bergarter (*som gnejs och granit*) och med stabil grundvattenzonering samt att deponering och borrhålens försegling kan genomföras utan att man varaktigt stör grundvattnets stratifiering (*densitetsskiktning*) kring förvaret.

Fyra saker är basala för konceptet djupa borrhål. Dels det stora djupet och dels grundvattnets densitetsstyrda zonering då detta hämmar uppåtriktade grundvattenflöden, och särskilt rörelser genom den hydrogeologiska övergångszonen (*se figur sid 8*), vilket medför att grundvattnet i normala urbergsområden på 3-5 km djup inte förs vidare uppåt

Det tredje är att man har påvisat att denna densitetsstyrda skiktning kan vara så stabil över tid att grundvatten på 3-5 km djup inte kommer i kontakt med biosfären ens under så långa tidsrymder som årmiljoner

Det fjärde är att dagens borrhåls teknik medger bredhålsborrning till stora djup

Bakom senare års borrhålskoncept finns termodynamiska studier som visar att man kan begränsa en borrhålsdeponis påverkan i närområdet genom att minst ha 200 m mellan deponins borrhål. Studierna visar också att det på 3-5 km djup saknas förutsättningar för vertikala grundvattenrörelser (*advektion*) utanför det termalt påverkade närområdet samt att en spridning av radionukleider genom kemisk diffusion blir extremt långsam i vertikalled (*mindre än ca 200 m på 1 miljon år, se ref 1 ovan*).

Säkerheten -- både på kort och lång sikt -- kan sägas vila på fyra faktorer som tillsammans bildar ett fler-barriärsystem:

- **det stora deponeringsdjupet (3-5 km)**, vilket minimerar risken för både avsiktliga och oavsiktliga intrång i förvarsområdet
- **det höga trycket (som på dessa djup minimerar andelen öppna sprickor i berget och därmed bergets permeabilitet)**, vilket begränsar grundvattnets mobilitet och därmed radionukleiders spridningsvägar i berggrunden
- **grundvattnets densitetsstyrda stratifiering**, vilket på 3-5 km djup motverkar vertikala grundvattenrörelser och särskilt rörelser genom berggrundens hydrogeologiska övergångszon
- **grundvattnets sammansättning**, vilket på 3-5 km djup ger en geokemisk miljö som motverkar radionukleiders spridning. I denna miljö är grundvattnet kemiskt reducerande, vilket hämmar löslighet och därmed transport av kritiska radionukleider. Vidare finns höga jonladdningar, vilket motverkar kolloidal transport av radionukleider

Utöver dessa av naturen givna skyddsbarriärer kan säkerheten förstärkas genom konstruerade, så kallade teknologiska barriärer. Detta kan bl.a ske genom att:

- **använda kapselmaterial som anpassats till den geokemiska miljön på 3-5 km djup**, vilket åtminstone i närtid bidrar till att avfallet hålls kvar inne i avfallskapslarna,
- **tillföra särskilda kemiska komponenter i borrhålens buffertmaterial (som bl.a behövs för att fylla ut mellan kapslarna)** för att via reaktioner med kritiska radionukleider, som jod¹²⁹, få dessa stabilt kemiskt bundna i deponiområdet.

Djupa borrhålsdeponier har en viktig konceptuell fördel i att säkerheten på både kort och lång sikt upprätthålls genom flera olika och **funktions-mässigt oberoende** barriärer, vilket minskar sårbarheten vid såväl yt nära som djupa störningar i förvarsområdet

En nackdel kan vara att det ännu tar många år att teknologiskt utveckla och verifiera ett borrhålskoncept. Vidare återstår att verifiera att det finns tillräckligt stora områden som på 3-5 km djup har ett stabilt skiktat grundvatten

Slutord. Intresset för borrhålsdeponering av högaktivt kärnavfall har ökat i takt med senare års kunskapsutveckling om berggrundens hydrogeologiska zoner. Borrindustrins snabba teknikutveckling under 2000-talet har också bidragit, särskilt som man nu kan genomföra såväl precisionsborrning som bredhålsborrning till stora djup. Exempelvis användes bredhålsborrning med ny styrteknik hösten 2010 vid den framgångsrika räddningen av instängda gruvarbetare på 700 m djup i Chile vid den precisa borrningen av ett 66 cm brett evakueringshål ned till de instängda. Och med mindre modifieringar för att kompensera för högre tryck bedöms denna borrhålsborrning även kunna användas för bredhålsborrning till flera km djup.

Konceptet djupa borrhål har också uppmärksamats för sin potential att bidra till att trygga en helt kärnvapenfri värld. Med en färdigutvecklad metod för deponering i djupa borrhål skulle internationella organ som FN och IAEA kunna samla in och genomföra en slutlig deponering av allt kärnvapenmaterial som framställts. Utopiskt idag, men kanske inte för kommande generationer. En kärnvapenedrustning underlättas ju om det finns en tillförlitlig metod för att systematiskt avlägsna alla klyvbara material från biosfären.

I flertalet nya studier utgår man från att avfallslager deponeras i halvmeterbredda borrhål på 3-5 km djup i kristallin berggrund, vilket innebär att fokus ligger kvar på samma typ av slutförvar som låg till grund för Kärnavfallsrådets utfrågning om djupa borrhål i mars 2007. Internationella resultat och rekommendationer har därför stor relevans även för svenska förhållanden, särskilt som flera studier genom sin breda vetenskapliga granskning ger också en kvalitativ bedömning av borrhålskonceptets fysiska, ekonomiska och teknologiska förutsättningar, vilket såväl myndigheter som regeringen efterfrågade efter granskningen av kraftindustrins alternativredovisningen i FUD 07.

6 Konceptet djupa borrhål – en lägesrapport om teknik, utformning, ekonomi och återtagbarhet

Teknologiska aspekter. För 10 år sen när borrhålskonceptet (*deep borehole disposal*) mer allmänt började ses som ett intressant alternativ till grunda deponier fanns flera oklarheter, främst om borrhåls-teknik, deponeringsteknik och förvarets utformning. Samtidigt bedömdes dessa frågor vara hanterbara på kort till medellång sikt (5-15 år).

Idag framgår (*bl.a ref 1-4*) att borrhåls-industrin har teknik för både precisionsborrning och bredhålsborrning till aktuella djup samt väl fungerande metoder för borrhålens konsolidering genom ”lining”, injektering och sektoriell igengjutning med ny genomborrning. Mest kostnadseffektivt bedöms vara att ha halvmeterbredda borrhål i deponeringszonen. Ny teknik bedöms även medge borrning med tryckluft, vilket med rör-lining kan öka borrhålens stabilitet. Vidare bedöms att dagens borrhålsoperationer, efter utveckling och stegvisa tester, ska klara en deponering av avfallskapslar till aktuella djup. Tidigare oklarheter om kapselintegritet bedöms nu vara hanterbara, bl.a genom att luta deponeringszonen ca 10 grader från vertikallplanet och genom att använda länkade kapslar som fixeras efter stegvis deponering.

Under kommande 3 år planeras pilotstudier i USA för att verifiera konceptets teknologiska grunder (*se ansökan och redovisning i ref 2 ovan*). Sammantaget krävs verifieringar och klarlägganden på flera områden, bl. för att koordinera borrhålsmetod och metoder för lining, deponering och fixering så att man inte försvårar för borrhålens slutliga försegling.

Borrhålens försegling bedöms allmänt kräva fortsatta klarlägganden, bl.a ska förseglingarna optimeras för olika riskscenarier då borrhålen annars skulle kunna främja uppåtriktade flöden med radioaktiva ämnen. Inga nya oklarheter har tillkommit och utgångspunkten är som tidigare att på lämpliga nivåer använda fler-skikt-förseglingar av det slag som bl.a SKB förordat i sina studier. Pilotstudier behövs också för att optimera materialen i fler-skikt-förseglingarna så att dessa inte skadas vid ökat gstryck eller ändrad geokemisk miljö.

Utformning. Tidigare osäkerhet om borrhålsförvarets *areella utformning* har minskat, främst för att man nu kan styra bredhålsborrningen, och därmed borrhålens placering och lutning, så att minimiavstånden upprätthålls längs hela den km-långa deponeringszonen. Dessa framsteg medför att borrhålens kapseltäthet och läge (främst inbördes avstånd) nu kan optimeras för att minimera förvarets termala påverkan på grundvattnets densitetsskiktning.

I en svensk studie 2006 (*SKB R-06-58*) bedömdes att det svenska kärnavfallet ryms i ca 45 borrhål och att dessa då skulle behöva en deponeringsareal på ca 10 km².

I senare amerikanska studier (*bl.a ref 1 ovan*) har man visat att det tidigare ansatta minimiavståndet mellan borrhålen (500 m) kan reduceras till ca 200 m, vilket medför att det svenska arealbehovet på deponeringsnivå snarare ligger i intervallet 2-4 km², vilket underlättar vid en etablering.

Ekonomi. Tidigare osäkerhet om deponins kostnader tycks ha minskat i takt med borrhåls-industrins tekniska framsteg och djupborrningens stabila kostnadsutveckling. Tidigare bedömningar tycks stå sig väl och pekar på kostnader i samma storleksordning som för grunda deponier av KBS-typ (*se ref 1, 2 och 6 ovan*).

Sammantaget tycks varken borrhålsförvarets areella utformning eller kostnader vara en minuspost i jämförelser med grunda deponier.

Återtagbarhet. Även borrhålsdeponins återtagbarhet av avfallskapslar har börjat utredas. En rätt allmän ståndpunkt är att återtagbarhet bara kan vara meningsfull under deponerings-skedet men knappast efter att borrhålen har förseglats. När man väl har utvecklat en tillförlitlig deponeringsteknik bedöms att deponerade avfallskapslar bör kunna återtas utan större teknologiska uppgraderingar. Här krävs pilotstudier för att verifiera men bedömningen verkar rimlig då såväl deponering som återtagande i stort kräver samma operativa borrhålsteknik. Och från denna utgångspunkt vore logiskt att utforma såväl kapslar som borrhålsdesign för att möjliggöra ett återtag av kapslar i borrhål som ännu ej förslutits.

Att även återta kapslar efter en förslutning av borrhålen, bedöms också vara teknologiskt möjligt, i alla fall så länge kapslarna förblir intakta. Mot detta talar att ett återtagande i detta skede torde bli så kostsamt och tidsödande att det knappast blir meningsfullt att utveckla en operativ teknik för just detta.

Det säkerhetsmässigt tveksamma med en **förberedd återtagbarhet** av kärnavfall som innehåller klyvbara ämnen som plutonium, uppmärksammas också. Främst för att slutförvaringens viktigaste mål är att trygga säkerheten på både kort och lång sikt. Och i ljuset av människans konfliktfyllda nutid och historia, vore kanske bättre även för kommande generationer att snarast möjligt och för all framtid placera allt plutoniumhaltigt kärnavfall utom räckhåll för människan eftersom vi i vår generation inte bör underlätta att något kärnavfall, någon gång, kommer i orätta händer och används vid illegal framställning av kärnvapen eller hot om detta.

Vidare står klart att varje förberedd återtagbarhet kan visa sig meningslös eftersom ingen här och nu kan trygga att kommande generationer verkligen kommer att ha den kompens och de resurser som krävs för att återta kärnavfall i km-djupa borrhål.

7 Borrhålskonceptets hydrogeologiska förutsättningar

På detta centrala område finns få bidrag i senare års studier och framstegen begränsas till att man genom bättre planeringsunderlag nu kan precisera vilka klarlägganden som krävs. Mer avgörande är kanske att konceptets hydrogeologiska förutsättningar förblivit intakta då det inte framkommit något som bedöms äventyra konceptets säkerhetsrelaterade förutsättningar, vare sig på kort, medellång eller lång sikt.

Värdefullt är också att man påvisat att djupa borrhålsdeponier har flera skyddsbarriärer som är oberoende av varandra för sin funktion, *se vidare i avsnitt 8 om fler-barriärprincipen*.

I min tidigare rapport till Kärnavfallsrådet om *”Brister i redovisningen av djupa borrhål som alternativmetod inför MKB-prövningen av ett svenskt slutförvar”*, mars 2009, redovisades bl.a vilka kompletterande kunskaper som behövs för konceptet djupa borrhål:

→ *uppgradera kunskapen om grundvattnets densitetsskiktning så att det åtminstone finns en relevant hydrogeologisk modell ned till 5 km djup,*

→ *påvisa att det, inom landet, finns områden med de hydrogeologiska förhållanden som borrhålskonceptet grundas på.*

Uppgradera kunskapen om grundvattnets densitetsskiktning

I denna punkt ryms ett oavvisligt krav för borrhålskonceptet; -- nämligen att verifiera de densitetsgradienter man använder i modelleringar för olika djup, såväl för övergångszonen som ända ned till deponeringszonen på 3-5 km djup.

Dessa verifieringar är nödvändiga då tillgängliga mätdata kommer från få och mycket spridda borrhål. Därtill har man använt skilda mätmetoder, vilket gör att tillförlitligheten måste verifieras i bättre koordinerade mätprogram. Vidare står klart att klarlägganden av övergångszonens hydrologiska och rumsliga karaktär samt variationer över tid är avgörande vid valet av förvaringsdjup för såväl grunda som djupa deponier i och med att det i båda fallen krävs goda säkerhetsmarginaler till denna zon.

Finns områden som är tillräckligt stora

Vid Kasams genomlysning av förutsättningarna för ett svenskt borrhålsförvar (mars -07) fanns bred enighet om, att det på basis av befintliga data är troligt att gynnsamma hydrogeologiska förhållanden existerar i relativt stora urbergsområden i Sverige. Men befintliga data visar enbart lokala förhållanden och för att verifiera att det inom landet finns **tillräckligt stora områden** med lämpliga hydrogeologiska och geokemiska förutsättningar, krävs kompletterande mätdata från åtminstone ett större område.

För närvarande finns inga svenska beslut om mätprogram i sonderande borrhål. Inköpet av en borrhålsrigg inom ramen för det svenska djupborrningsprogrammet (SDDP) öppnar dock för möjligheten att i samverkan med SDDP genomföra sonderande borrhåll i lämplig gnejs- och granitberggrund.

Behovet att verifiera borrhålskonceptets fysiska realiserbarhet har också lyfts fram i amerikanska studier. Bedömningen är att sonderande mätningar måste göras i flera borrhål inom ett lämpligt område, åtminstone ned till 3-4 km djup, i syfte att klarlägga grundvattnets sammansättning, densitetsskiktning och skiktningens stabilitet över tid.

8 Slutsatser för valet av deponeringsdjup

→ I normal kontinental berggrund av svensk typ (*urberg*) finns hydrogeologiska och geokemiska faktorer som medför att det i praktiken bara finns två alternativ för slutförvaringen av högaktivt kärnavfall; -- **en grund deponering** (ca 500 m ned) **och en djup deponering** (ca 3-5 km ned).

Med valet av deponeringsdjup följer att antingen optimera säkerheten för de förhållanden som råder på ca 500 m djup eller för de på ca 3-5 km djup

→ Före 1990-talets upptäckter om berggrundens hydrogeologiska zonerings fanns få skäl att välja andra deponeringsdjup än ca 500 m ned. Med insikten att berggrundens hydrogeologiska zonerings kan vara så stabil över tid att grundvatten på några km djup inte förs uppåt, och på så sätt når upp till biosfären, ändrades förutsättningarna för hela avfallsfrågan.

→ En slutförvaring i urberg på 3-5 km djup förutsätter att avfallskapslarna deponeras i **djupa borrhål** och konceptet förutsätter att förvaret kan placeras i ett område med lämpliga bergarter (*som gnejs och granit*) och med stabil grundvattenzonerings samt att deponering och borrhålets försegling kan genomföras utan att påverka grundvattnets densitetsskiktning.

→ Valet av deponeringsdjup är komplicerat. Framst för att båda alternativen också har nackdelar. Valet beror även på hur vi bedömer den framtida samhällsutvecklingen, men också hur vi bedömer att förhållandena i berggrunden kan variera under kommande årtusenden. Och sådana överväganden kommer alltid att innehålla osäkerheter, vilket talar för att prioritera slutförvaringsmetoder som baseras på **"förlåtande teknik"**. Exempelvis kunde Vägverket snabbt minska antalet dödoiltyckor i trafiken genom nybyggnad och ombyggnad av vägar efter denna princip.

Sist och inte minst beror valet av förvaringsdjup på våra etiska ställningstaganden och hur vi vill prioritera mellan de delvis motstridiga mål som finns för ett svenskt slutförvar

Ex.vis kan vi inte säkra kärnavfallens oåtkomlighet -- vare sig på kort eller lång sikt -- om vi samtidigt vill att deponerat avfall ska kunna återtas

→ Valet av slutförvaringsmetod, och därmed av förvaringsdjup, beror således på flera komplexa och delvis okända faktorer. Vidare behövs mer detaljerad kunskap om borrhålskonceptet innan vi kan göra den allsidiga jämförelse av slutförvaringsalternativen som MKB-lagstiftningen föreskriver.

→ Men det finns också **grundläggande skillnader** mellan grunda och djupa deponier, vilket möjliggör säkerhetsrelaterade jämförelser just genom att förvaringsdjupen och därmed också deponiernas skyddsbarriärer är så olika.

→ Av redovisningen i avsnitt 4 och 5 framgår att grunda deponier har påvisbara säkerhetsfördelar i närtid medan djupa deponier bedöms ha god potential att också ge fullgod säkerhet över tid (*excellent long-term safety performance*), förutsatt att deponeringen kan genomföras utan att påverka grundvattnets densitetsskiktning.

Tre faktorer. Fortfarande finns vitt skilda bedömningar över vilka reala säkerhetsvinster som kan uppnås med en djup deponering. Exempelvis hävdar den svenska kraftindustrin i sina FUD-rapporter att det inte finns några egentliga fördelar med en djup deponering medan man i senare års amerikanska och engelska studier kommit till helt andra slutsatser.

Nedan följer ett försök till jämförande analys av tre **säkerhetsrelaterade faktorer** som tycks ha bidragit till den svenska kraftindustrins skeptiska hållning till en djup deponering.

Fler-barriärprincipen

I SKB:s FUD-redovisning bedöms grunda deponier av KBS-typ ha ett tillförlitligt system av skyddsbarriärer medan djupa borrhålsförvar skulle sakna ett motsvarande fler-barriärssystem.

Denna bedömning tycks inte grundas på nu tillgängliga data. Exempelvis framgår av redovisningen av djupa deponier (*sid 12-14*) att säkerheten för ett slutförvar på 3-5 km djup baseras på fyra olika skyddsbarriärer (*som därtill är väl testade över tid då de är av naturen givna*) samt två teknikbaserade.

Antalet barriärer är dock mindre relevant eftersom säkerheten avgörs av barriärernas samlade skyddsfunktion. Och här finns en viktig skillnad i och med att en borrhålsdeponi har flera barriärer som inte är beroende av varandra för sin skyddsfunktion medan grunda deponiers skyddsbarriärer är beroende av varandra för att fungera över tid. Bland annat behöver KBS-systemets bentonitbarriär fungera väl överallt för att säkra en geokemisk miljö som motverkar kopparkapselns korrosion. Och för att bentoniten ska fungera som barriär måste den överallt tillföras grundvatten från berget men bara i en omfattning som inte skadar bentoniten.

I och med att grunda deponier har ett sämre skydd mot såväl avsiktliga som oavsiktliga intrång i förvarsområdet, accentueras svagheten med skyddsbarriärer som inte är funktionsmässigt oberoende eftersom funktions-skador på en barriär medför att hela skyddssystemet då kan degraderas i snabb takt.

För att inte dessa konceptuella skillnader ska övertolkas, vill jag betona att det fortfarande återstår att verifiera vilket deponeringsdjup och barriärssystem som ger bäst säkerhet, både på kort och lång sikt.

Fler-barriärprincipen är viktig eftersom den tydliggör ett sätt att göra slutförvaringen mer robust. Avgörande är inte antalet skyddsbarriärer utan att förvaret skyddas av barriärer som över tid kan fungera oberoende av varandra

För borrhålsdeponier på 3-5 km djup finns både naturliga och konstruerade skyddsbarriärer där flertalet fungerar oberoende av varandra medan man ännu inte har kunnat konstruera ett system av funktionsmässigt oberoende barriärer för grunda deponier av KBS-typ

Förvarens lokalisering

”Att lokalisera ett område för deponering i djupa borrhål är förenat med större osäkerheter än motsvarande lokalisering av ett KBS-förvar” (FUD 07, sid 388).

För grunda deponier av KBS-typ har homogent urberg med låg permeabilitet och stabil geokemisk miljö bedömts viktiga för att säkra barriärernas funktion och därmed säkerheten på både kort och lång sikt. Mest grannlaga tycks vara att finna ett kapselmaterial som står sig över tid i den geokemiska miljön på ca 500 m djup och att bentonitlerans skyddsfunktion ska aktiveras tillräckligt snabbt, vilket sker genom att bentonitleran sväller när vatten tas upp från omgivande berg. För detta krävs att berggrunden åtminstone har en viss permeabilitet så att grundvatten kan nå bentoniten och därmed aktivera sväll-lerans skyddsfunktion. Men grundvatten får inte tillföras så snabbt att leran kan spolats bort av vattentrycket i någon del av förvaret innan den hunnit svälla så mycket att deponerade kapslar kan hållas kvar på rätt plats i deponeringsschakten.

Att säkra förvarets skyddsfunktioner har därför högsta prioritet vid platsvalet för grunda deponier.

Att det är mer tekniskt komplicerat att klarlägga hydrogeologiska förhållanden på stora djup är uppenbart. Men även om en områdeslokalisering för en djup deponi kräver en mer avancerad borrh- och mätutrustning, behöver inte lokaliseringsprocessen i sig bli mer osäker eller tidsödande.

För djupa borrhålsförvar finns en bred samsyn att lämpliga områden bör eftersökas i regioner med stora och välblottade urbergsområden med vanliga bergarter, som gnejs och granit. Vidare bör regioner med flack topografi prioriteras, bl.a av hydrogeologiska skäl. Och områden som uppfyller dessa kriterier är vanliga på alla kontinenter, liksom i stora delar av Sverige utanför fjällkedjan.

I några amerikanska studier anges att det kan finnas fördelar med urbergsområden som täcks av 300-1500 m tjocka lager av yngre sedimentära bergarter med inlagringar av särskilt täta bergartsled. Nackdelen kan vara att det då blir svårare att urskilja spricksystem och bergartsgränser inom deponiområdet. Även denna typ av berggrund finns på alla kontinenter; -- men knappast i tillräcklig omfattning i Sverige.

Först som sist; -- det som styr valet av plats för en borrhålsdeponi är grundvattnets densitetsskiktning. Ju stabilare den är i ett område, desto bättre. Ett undersökningsprogram på 10-15 år borde räcka för att lokalisera lämpliga områden. Och även med väl tilltagen reservtid skulle hela programmet rymmas inom samma tidsomfång som KBS-metodens platsvalsprocess.

Effekter av jordskalv och istider

Vid Kasam-seminariet i mars 2007, och upprepat i FUD 07 (sid 392-394), redovisade SKB en ny sammanställning över svenska jordskalv som uppgavs visa en ökad risk för djupa borrhålsförvar vid jordskalv och istider.

Att nedisningar och stora jordskalv kan medföra ändrade hydrogeologiska förhållanden i berggrunden och även skada deponerade avfallskapslar, är väl känt. Likaså att det blir problem om det uppstår läckage i grunda geologiska deponier eftersom omgivande grundvatten har kapacitet att föra läckage vidare mot marknära nivåer i grundvattnets utströmningsområden.

För borrhålsdeponier bedöms jordskalv och istider vara ett mindre problem då grundvattnets densitetsskiktning och låga mobilitet på 3-5 km djup hämmar grundvattenflöden och särskilt uppåtriktade flöden, vilket innebär att även stora läckage av radioaktiva ämnen blir kvar på deponeringsnivån förutsatt att deponin har placerats i ett område med stabil densitetsskiktning.

Bakom dessa för borrhålskonceptet centrala bedömningar finns mätdata som visar att grundvattnets densitetsskiktning kan bevaras under årmiljoner ***även i områden som bevisligen har genomgått upprepade perioder av jordskalv och nedisningar.*** Notabelt är att dessa fakta också finns i SKBs rapporter (*SKB R-04-09 och SKB TR-98-05*) och att de där följs av slutsatsen att grundvattnets zonerings kan vara mycket stabil över tid även i perioder av istider och stora jordskalv.